

多摩川の環境と魚類の 活動性に関する研究

——汚染指標としての活動力の測定——

1979年

井 上 実
東京水産大学教授

目 次

昭和52年度

I 目 的	1
II 測定装置・方法	1
1. 110 cm円形水路	2
2. 60 cm円形水路	3
3. 二重円形水路	4
4. 2 m直線水路	5
5. 1 m直線水路	6
III 実験魚	7
IV 結 果	8
1. 110 cm円形水路による実験	8
2. 60 cm円形水路による実験	10
3. 二重円形水路による実験	16
4. 2 m直線水路による実験	18
5. 1 m直線水路による実験	18
V 考察及び今後の問題点	21
VI 要 約	22

昭和53年度

I 目 的	25
II 実験魚	26
III 実験装置・方法	26
IV 結 果	28
1. 3魚種の群れ分散度	28
2. 河川水と群れ行動	31
3. 界面活性剤ABSの影響の測定	34
4. 群れ分散の光学的測定	36
V 考 察	37
VI 要 約	37

多摩川の環境と魚類の活動性に関する研究 — 汚染指標としての活動力の測定 —

研究代表者 井 上 実

I 目 的

本研究は河川の汚染度を調べる指標として、河川魚類の活動力を用いることができるかどうかを調査すること、及びその調査と併行して多摩川及びその近隣河川の魚類の活動力の測定を行ない、多摩川を中心とした河川の環境と魚類の活動性の関連を把握しようとするものである。

魚類を河川の汚染度の生物指標として用いる場合は、魚種や個体数の増減あるいは分布の変化を目安としている。しかし、この方法による調査を正確に行なうことは極めて困難であることは水野¹⁾によってすでに指摘されている。その問題点はまず魚類の採集の定量化が極めてむづかしいこと、魚と環境との対応のしかたの複雑さ、例えば魚は移動力をもち汚染域から逃避するので、水質との関連を明解にとらえることがむづかしいこと、さらには河川間で魚類相が異なる上に、漁法の違いも加わって河川間の魚種や個体数の比較を行ない、それによって河川汚染度を検討することは余り意味がないことなどである。

本研究では魚類の活動力を生物指標として使うことの可能性を調べるために、魚類の活動性をその遊泳力をもって表わし、遊泳力は最大遊泳速度あるいは耐久遊泳時間をもって測定することを試みた。魚類の遊泳力に関係する内部的、外部的要因はさまざまであるが、そのうち水質が極めて支配的な要因になることは容易に考えられる。もとより魚類の遊泳力の測定に高精度を要求することは困難であるが、水質差が顕著である場合には実験魚の遊泳力の変化をもって汚染度を示す指標とすることができるようにも思われる。本研究ではこのような意図のもとに、多摩川及び近隣河川の魚類と河川水を用い、魚類の遊泳力に関する実験を行ったので報告する。

II 測定装置・方法

研究の方法は、1)魚類の遊泳力の測定方法の検討、2)目的河川魚類への測定方法の適用の2段階に分れる。本年度の研究は1)を中心に実施したが、その過程で2)についても実験を行った。

1)については5種類の方法を考案し、それに伴う5種類の装置を使用したので、まずそれらの装置、方法についての概略を説明する。

使用した測定装置は次の5種類である。

1. 110 cm (最大直径)円形水路
2. 60 cm (最大直径)円形水路
3. 二重円形水路
4. 2 m直線水路

5. 1 m 直線水路

これらのうち、1～3は実験室で、4, 5は河川で使用した。

1. 110 cm 円形水路

装置の概略は図1のようで、水路(巾10 cm、高さ15 cm)が1/2HPモーターにより定速回転すると、水路のなかの水は動き始め、1分後には定速の水流が得られる。水路に水深7.5 cmまで水を入れた場合、水路の回転速度 V と流速 v との関係は $v = 0.9 V$ で、モーターの回転を減速して得られる流速の範囲は30-70 cm/secである。

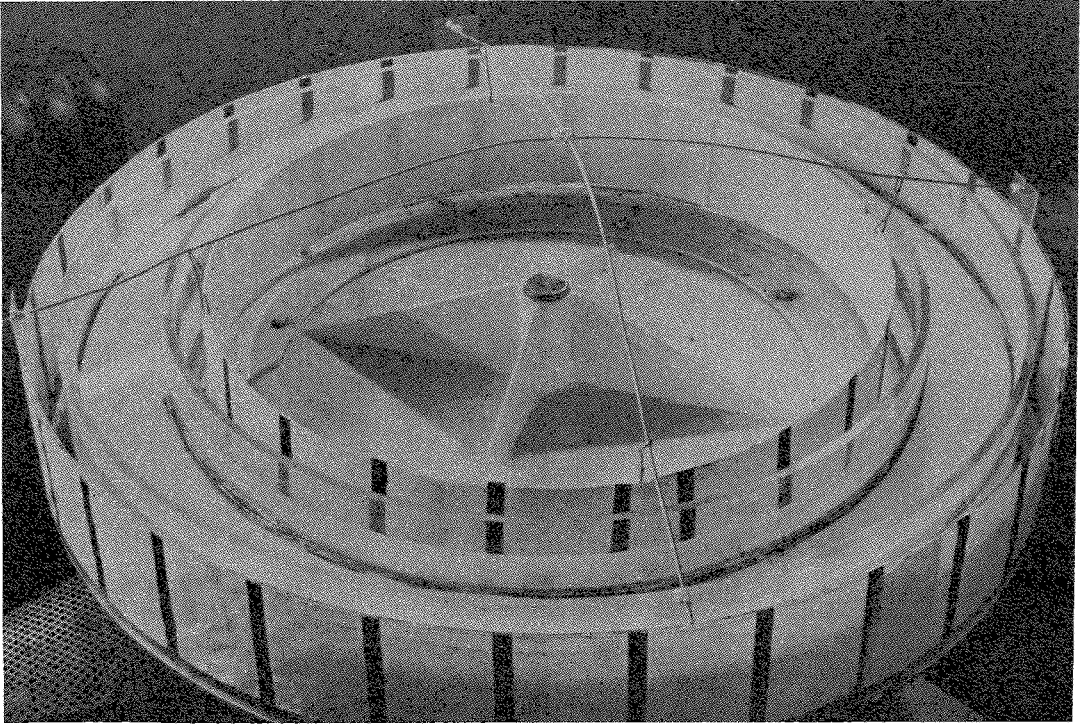


図1. 110 cm 円形水路

水路に入れた実験魚に水流方向に向って泳ぐ走流行動をとらせるためには、視覚目標が必要であるから、水路をとり巻く透明な円形アクリル壁に黒白の縦縞模様の紙を貼り巡らし、視覚刺激用のスクリーンとした。

黒と白の縞模様の幅の関係については十分検討されていないが、INOUE²⁾の研究によれば黒1、白3ぐらいが視覚運動反応を起こさせる上で効果的とされているので、ここではその結果に基づき黒縞の幅1.8

cm、白縞の幅5.4 cmとした。なお、水路は回転せず、黑白縞模様のスクリーンだけの回転によっても魚に遊泳行動を起こさせることができる。これは魚類の視覚運動反応によるもので、本研究でもこの反応を利用して魚に遊泳行動を起こさせ、活動力判定の一方法とした。

また、この水路は開放流水型で空気との接触による酸素補給と、魚の遊泳に伴う酸素の消費との収支のバランスは、体長10 cmのウグイを40 cm/secの水流で1時間泳がせた場合、0.5 mg/lほど消費が大きい。さらに、河川水について溶存酸素量を測定した結果によると、多摩川下流水(DO, 3.39 mg/l)を実験室まで18 lポリエチレン容器で運搬すると7.54 mg/lとなり、その水を直ちに水路にあけると、8.78 mg/lまで増加することが分った。しかし、試水をビン中に1日密閉し暗所に静置しておくと、3.03 mg/lに下った。以上の測定の際の水温は16℃であった。

2. 60 cm円形水路

本装置は図2のように110 cm円形水路を小型、軽便化したもので、現地測定を考慮して運搬を可能にした。水路の幅は10 cm、高さ15 cm、最大直径60 cmで、110 cm円形水路と比べ水路の容量は1/2である。したがって、採水してきた河川水を装置に入れる際は少量で足りる利点があるが、水路の曲率が小さいので、大きい魚には適用が困難である。

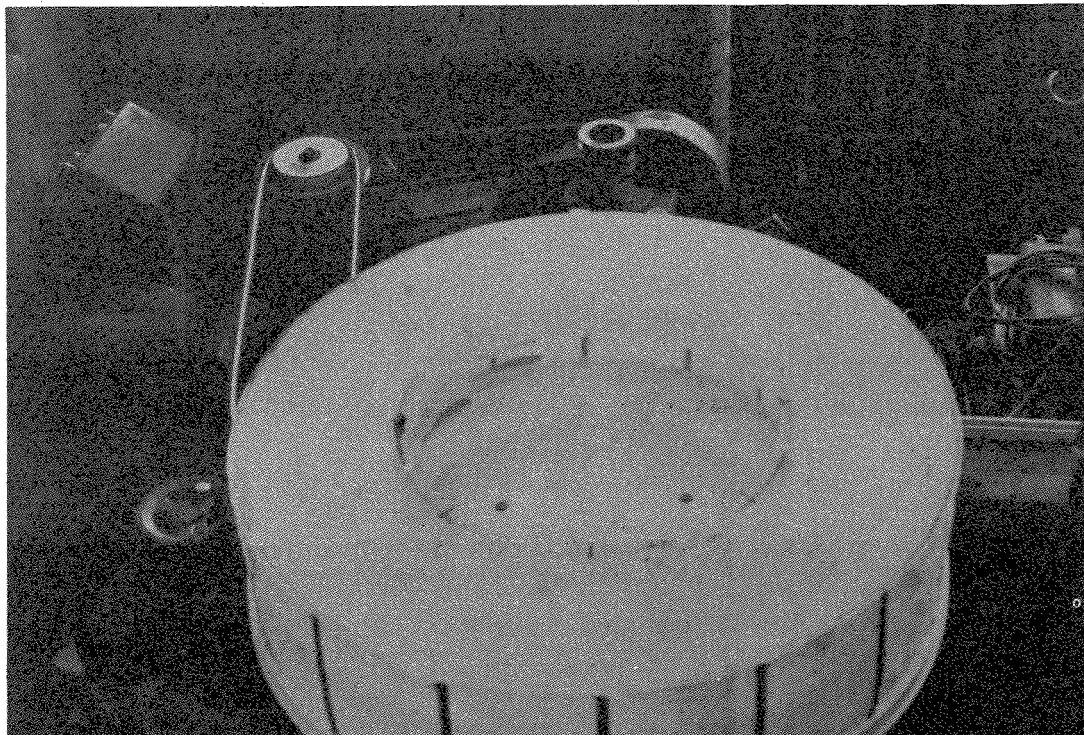


図2. 60 cm円形水路

当初は現地で使用し、手動で水路を回転する計画であったが、その後長時間の測定が必要となり、動力による操作も可能になるように改良した。流速の範囲は2.0～6.0 cm/secである。

本装置による実験は、1)ニジマス(人工飼育)、タモロコ、ウグイ、オイカワ、アブラハヤ(多摩川、酒匂川、那珂川産)の遊泳速度の測定、2)洗剤、界面活性剤混入による魚類の遊泳力への影響、3)各河川(多摩川、狩野川、酒匂川)の水による魚類の遊泳力の測定である。

3. 二重円形水路

本装置(図3)は大小二重の円形水路から成るもので、本来の目的は内側、外側の水路にそれぞれ魚を入れ、これらの魚の視覚的誘引性を調べるものである。内側の水路は110cm(最大直径)の円形水路と同じ大きさであり、外側の水路の最大直径は123cmで、内側水路と同じ幅、同じ高さをもって間隔3cmで内側水路をとり巻いている。

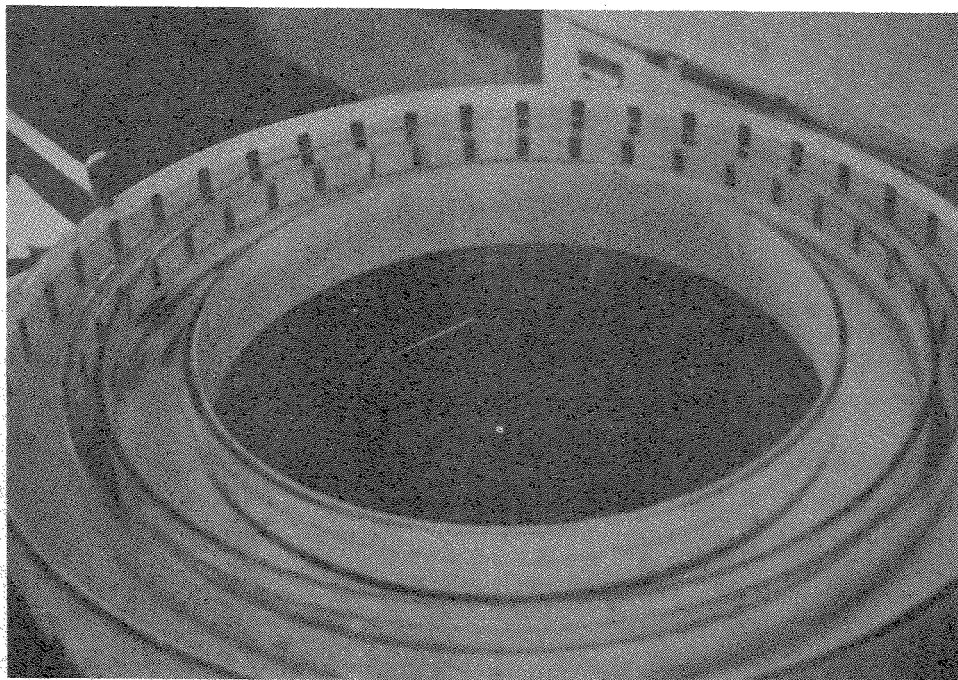


図3. 二重円形水路

本研究では濁度と魚の遊泳行動の関係を調べるため、内側水路には魚、外側水路には濁水を入れ、さらに外側水路の外側には視覚刺激用の黒・白縞模様を巡らした。内側水路を静止したまま外側水路を回転すると、外側水路の縞模様の移動に対し魚は視覚運動反応を起こして追従回転をする。その際、水の濁りの程度によって、魚は縞模様が見えにくくなり追従行動も鈍くなる。この測定方法は河川の濁度が魚の遊泳行動に及ぼす影響、それに伴う魚の河川における分散機構を推察するのに役立つ。しかし、何分にも基礎的な測定方法であるため、この研究結果をふまえて河川での目標視認のしくみを調べるため、河川に設置できる透明な1m直線水路を試作した。

本装置で行った実験は、1)アブラハヤ(那珂川産)による濁度と視覚運動反応との関係、2)フナ(多摩川産)、ニジマス(人工飼育)、アブラハヤ(那珂川産)の視覚運動反応の比較である。

4. 2 m 直線水路

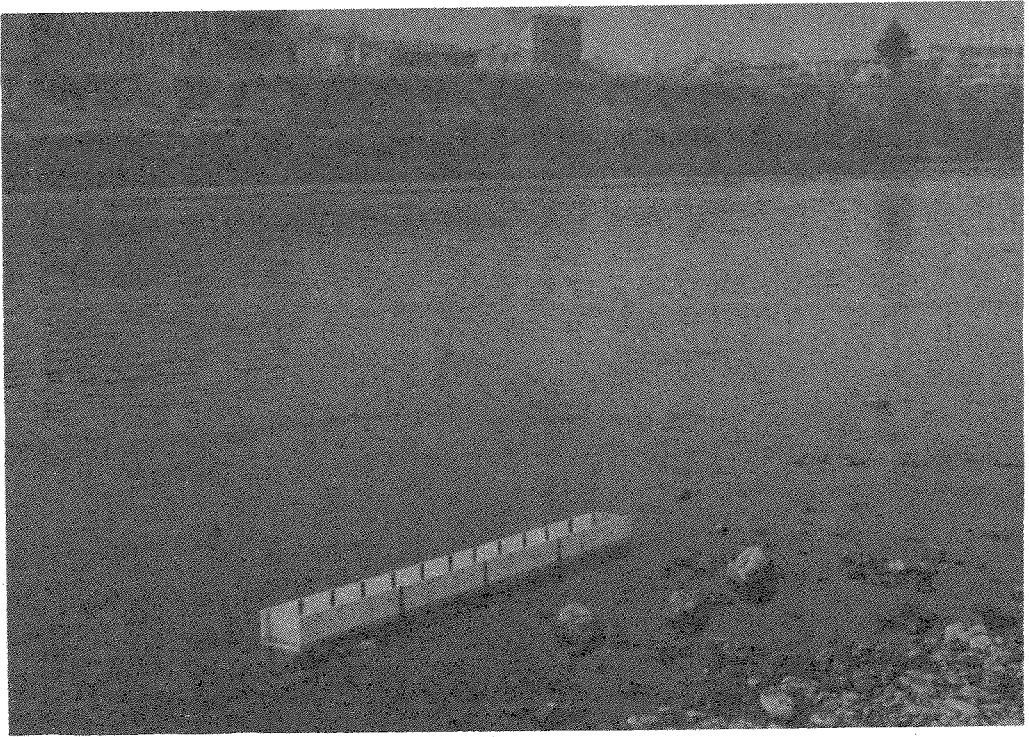


図 4. 2 m 直線水路

白色アクリル板(厚さ4mm)により、長さ2m、幅10cmの直線水路を作り、図4のように水路の内側に黒ビニールテープを貼り視覚目標とし、この水路を河川に設置して魚を遊泳させることを試みた。試作段階で水路に明瞭な流速勾配が生ずるように水路の前面、後面に挿入する網地フィルターの高さ、目合を考慮した。流速勾配を作ったのは、実験の初期段階では魚は水路内の流れの速い位置を選び、時間経過とともに疲労が生じた場合には流れの緩やかな位置を選択する行動をとるものの仮定し、その行動を測定に利用することを考えたからである。

水路内の流速分布は東京水産大学漁具学研究室設置の回流水槽によって測定し、数種のフィルターのうち、目合26節(0.9cm)、糸の直径0.36mmの網地を使用した場合、4等分した水路区域(図5)で水路の上流より1.7、1.5、1.2、1.0の割合の流速分布を得たので、一応このフィルターを使用して、多摩川流域で観察を行った。

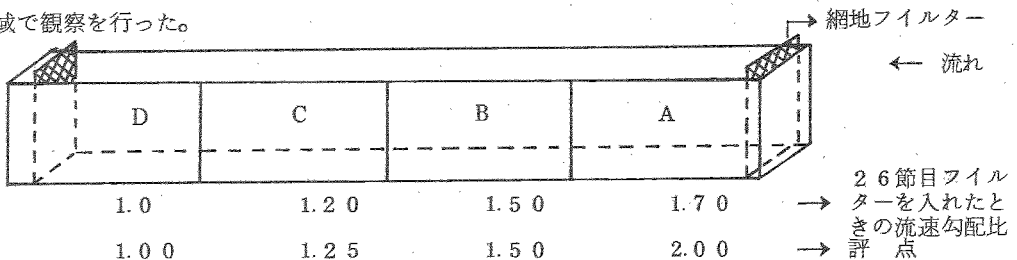


図 5. 2 m 直線水路による観測方法

実験魚のすべては水路内に入れられると同時に水路の上流に位置し、時間経過とともに下流に位置することが認められたので、上記の仮定は正しいものと思われた。しかし、魚が水路内で遊泳し続けた結果、上流から下流に位置を変更するようになるのには約2時間を要することが判明した。また多摩川下流で測定した際はフィルターにごみや付着藻類が着き、目づまりを起こすので下流域の測定には適当でないことも判明した。

本装置による実験は、1)多摩川上流・中流・下流域でのオイカワ、ウグイ、アブラハヤ、タモロコ(多摩川産)、ニジマス(人工飼育)による遊泳力指数の測定である。

5. 1 m 直線水路

黑白縞模様のような視覚目標が魚類の走流行動に必要なことはよく知られている³⁾。河川においては走流性を有する魚は石や水草のような視覚目標をとって位置を保持するであろうが、それらの目標は視覚刺激としてどの程度の有効性をもつかは明らかでない。一方、水の濁度が魚の走流行動に影響を及ぼすことも明らかで、河川が降雨増水などにより濁った場合、魚は視覚目標を定めることができず、日常の生活流域から流されてしまうことも考えられる。このような場合の河川での目標視認の難易性は、おそらく魚種によって異なるであろう。したがって、このことを調べることは河川での魚類の分布の機構を知る上で役立つものと思われる。

本研究では2 m直線水路の変形として、図6のような長さ1 m、幅50 cm、高さ50 cmの透明アクリル水路を作製した。長さ1 mとしたのは持運びを容易にするためである。水路は透明であるから水路のなかの魚は側面、あるいは底面の石、沈積物を見ることができる。

本装置を用い、オイカワ、タモロコ、ウグイ、アブラハヤ(多摩川産)の遊泳行動の観察を多摩川上流、中流域で行った。

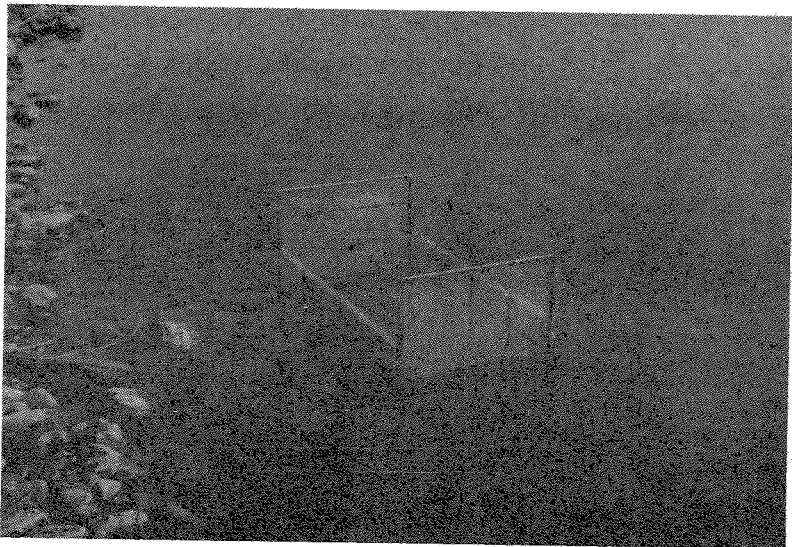


図6. 1 m直線水路

以上のように5種類の装置によって種々の実験を行ったが、研究方法を大別すると、

- (1) 河川での測定(装置4と5による)
- (2) 実験室での測定(装置1、2、3による)に分れる。

また、(2)の実験室での測定は、I)河川水を水槽に入れ魚を飼育し、その魚の遊泳行動を測定する方法、II)河川水を水路に入れ魚の遊泳行動を測定する方法、III)人工的に汚染水を作り魚の遊泳行動を測定する方法に分れる。

III 実験魚

本研究に当って採集した魚はヤマメ *Oncorhynchus masou* (Brevoort)、タモロコ *Gnathopogon elongatus elongatus* (Temminck et Schlegel)、ウグイ *Tribolodon hakonensis* (Günther)、アブラハヤ *Moroko steindachneri* (Sauvage)、オイカワ *Zacco platypus* (Temminck et Schlegel)、フナ(ギンブナ *Carassius auratus langsdorfi* とキンブナ *Carassius auratus subsp.*)、ツチフキ *Abbottina rivularis* (Basilewsky)、カマツカ *Pseudogobio esocinus* (Temminck et Schlegel)、カワムツ *Zacco temminck et Schlegel* で、その他、ニジマス *Salmo gairdneri* Richardson は人工飼育のものを用いた。ツチフキ、カマツカ、カワムツは遊泳力の測定には使用しなかった。

上記の魚はニジマスを除いては、すべて多摩川産であるが、オイカワ、ウグイ、フナは酒匂川産のもの、アブラハヤは那珂川産のものも含まれる。

実験に使用する際は病気がないもの、実験水路の大きさに適合する一定範囲の体長(8~13cm)のものを選択する必要があるので、1ヶ所の採集地域からなるべく多数の個体を採集した。

採集は漁業協同組合に依頼して投網により漁獲してもらう方法、淡水魚専門店に依頼して、捕獲場所の明確な魚を集めてもらう方法、多摩川流域に在住する釣り趣味の人に依頼して、釣獲してもらう方法などによった。

実験室に運んだ魚は、現地河川水あるいは水道水をチオ硫酸ソーダで脱塩素した水を用いて飼育した。水槽はガラス水槽(60×45×45cm)を多数用意し、1つの水槽に1種類ないし2種類の魚を10尾程度入れ、毎日1回残量のない程度にコイ用ペレットを給餌した。実験のため飼育した最長の日数は13日である。水温は実験期間が冬期(11~3月)であったため、飼育に好適な14~20℃に保つことができた。

多摩川の上・中・下流は次のように区分し、現地測定、実験魚の採集及び採水を行った。

上流：昭和橋付近

中流：日野橋付近

下流：双子橋付近

表1はヤマメについての観測結果である。この表で明らかなことは、多摩川上流水飼育と下流水飼育によるヤマメの遊泳力指数を比較すると、ろ過を行わない飼育3日目までの上流水飼育のヤマメの遊泳力指数は極めて高く、反対に下流水飼育によるヤマメの指数は極めて低い。これはヤマメが上流の清澄な水に生育していることを考えれば当然の結果であろう。また、水槽のろ過の効果も明らかで、ろ過を開始した当日にはその現響は現われていないが、翌日には上・中・下流あるいは水道水飼育の何れの魚でも遊泳力指数は高くなっている。

表2. 110cm円形水路による魚類の遊泳力指数の測定

水温 19~20℃

飼育水路 測定日	タモロコ (多摩川中流産)			アブラハヤ (那珂川産)			ウグイ (多摩川中流産)			オイカワ (多摩川下流産)			タモロコ 多摩川 中流	オイカワ 多摩川 下流			
	多摩川 上流	中流	下流	上流	中流	下流	上流	中流	下流	上流	中流	下流	水道水	水道水			
	多摩川 上流	中流	下流	上流	中流	下流	上流	中流	下流	上流	中流	下流	水道水	水道水			
11/22 (飼育後1日)	-6	-181	-194	-68	-2208	-54							-183	-190	-96		
11/23 (飼育後2日)	-40	-1836	-7865	-2277	-2340	-7155	-283	-140	-296	-520	-440	-6364	749				
11/24 (飼育後3日)	-1417	-1085	-4288	432	-4200	-8065	-1827	-7206	-66	630	-850	-8010					
11/25 (飼育後4日 ろ過開始)	-32	-474	-4950	5	-2814	16554	-2715	-8507	-168							-189	-450
11/26 (飼育後5日)	-258	-85	-5740	-258	-85	-5074	164	-3360								-48	-98

ヤマメと同じ方法で測定したタモロコ、アブラハヤ、ウグイ、オイカワについての要約した結果は表2に示される。同表によれば、ろ過開始前まではタモロコ、アブラハヤでは上・中・下流水の順で遊泳力指数は高く、ウグイは下流水で高く、オイカワは上・中流水で高いが、上・中流水間には殆ど差がない。この結果は、アブラハヤは比較的上流だけにみられ、ウグイ、オイカワは中・下流に多くみられるという多摩川の魚類分布に関する調査結果⁴⁾⁵⁾をある程度反映していると思われる。また、ろ過による遊泳力の回復はヤマメの場合のように明瞭ではないが、一応認められる。

上記の方法は最初に採用した測定方法であるが、問題点の1つは採水、運搬、給水(水槽、水路へ)などの操作による試水の溶存酸素量の変化、また試水保存中の懸濁物の沈降を始めとする水質変化などを無視していることである。したがって、表1、2に示された水域による遊泳力の変化が、河川水の水質の影響を正に反映しているかどうかは疑問で、今後は資料数を多くし、また生理学的手法及び水質の精密な把握も加えて検討すべきである。

また問題点の2は15分という短時間の観測時間にある。これは本実験では同一個体による継続測定を計画したので疲労の蓄積を考慮したことと、測定種類、個体数を多くすることを考えたためであり、その代り30秒ごとの遊泳位置変化の記録というマイクロな行動観測法を採用した。しかし、長時間ではとも角、

短時間における魚の位置変化が魚の疲労の正確な反映であるとはいえ、疲労の測定にはマイクロな観察よりも長時間にわたる耐久遊泳時間を測定する方が妥当性をもつものと思われる。

2. 60cm円形水路による実験

本装置は110cm円形水路とは同様の構造であるが、水路を満す水量は110cm水路の $\frac{1}{2}$ で、10ℓで足りる利点があり、河川水利用には便利である。水交換は連続測定を行なう魚種が同種の場合は3尾終了後、異種の場合はその都度行った。これは前者では3尾まで測定を行なうと魚の排泄物が目立ち、それが魚の走流行動に視覚的な影響を及ぼすこと、後者では種間の生物的影響を考慮したことによる。

本装置を用い、まず魚種別、流速別、水路水質別に疲労の生ずるまでの耐久遊泳時間を測定し、その過程で遊泳力の個体差についても検討した。実験魚は脱塩素水道水（以下、すべて水道水は脱塩素）を入れた4水槽にウグイ、ニジマス、オイカワ、フナを1魚種につき5尾ずつ入れ、5日間ぐらい飼育したものを使用し、試水は実験水路だけの変化とし、水道水、多摩川上・中・下流水を用いた。一般的に水路内で魚の遊泳速度を測定する場合は、最大遊泳速度あるいは巡航速度を求める⁶⁾。最大遊泳速度は体長（ $B \cdot L$ ）の10倍の流速（ $10 B \cdot L \text{ cm/sec}$ ）に抗して泳ぐ速度で求め、巡航速度は体長の2～3倍の流速（ $2 \sim 3 B \cdot L \text{ cm/sec}$ ）に抗して泳ぐ速度で求める。しかし、本装置で求められる流速は体長（実験魚の平均体長は約10cm）の6倍が限度なので、 $3 B \cdot L \text{ cm/sec}$ と $6 B \cdot L \text{ cm/sec}$ とについて疲労の生ずるまでの耐久遊泳時間を求めた。「疲労」の定義については魚が水流に抗し切れず、それ迄保持していた位置を離れ始め、水路内を5回以上連続して後退した場合とした。その際、魚が流れに向いても後退している限り回数に含めた。測定結果は表3に示される。

表3. 4魚種の流速 $3B \cdot L$ と $6B \cdot L \text{ cm/sec}$ に対する耐久遊泳時間(分)

水温16~18℃

測定日		12/7~12/15		12/16~12/24		1/9~1/17		1/20~1/28		
魚種		ウグイ (多摩川中流産)		オイカワ (多摩川下流産)		フナ (多摩川下流産)		ニジマス (人工飼育)		
体長範囲cm		10~13		8~11		8~10		10~12		
流速 cm/sec		$3B \cdot L$	$6B \cdot L$	$3B \cdot L$	$6B \cdot L$	$3B \cdot L$	$6B \cdot L$	$3B \cdot L$	$6B \cdot L$	
水質 (水路水)	水道水 (脱塩素)	300	80	250	60	180	20	300	180	
		250	100	200	80	150	40	250	200	
		360	90	300	60	100	50	300	160	
		360	140	240	70	220	70	240	230	
	平均	320	100	250	70	160	50	270	190	
	多摩川 上流水	420	160	200	70	200	20	240	200	
		300	100	260	50	180	40	320	180	
		平均	360	130	230	60	190	30	280	190
		多摩川 下流水	360	160	200	80	200	40	200	120
	300		120	240	40	160	35	160	80	
平均	330	140	220	60	180	40	190	100		

※ 平均は10分単位で4拾5入

流速 $3 B \cdot L_{cm}/sec$ ではウグイ、ニジマスは水道水、多摩川上・下流水のなかを楽々と5時間以上を泳ぎ続け、オイカワはそれよりやや早めに疲労を生じるものの4時間は泳ぎ続け、フナは3時間程度で疲労が生じた。

流速 $6 B \cdot L_{cm}/sec$ では耐久時間は流速 $3 B \cdot L_{cm}/sec$ の約 $\frac{1}{3}$ となり、ウグイでは約2時間、ニジマスでは約3時間、オイカワでは約1時間、フナでは30分程度である。水質の違いにより耐久遊泳時間に差がみられるのは、流速 $3 B \cdot L_{cm}/sec$ でも $6 B \cdot L_{cm}/sec$ でもニジマスだけで、 $3 B \cdot L_{cm}/sec$ では上流水は下流水の1.5倍、 $6 B \cdot L_{cm}/sec$ では1.9倍となっている。水道水と上流水ではニジマスでも差はみられない。

この結果から考え、魚の耐久遊泳時間を測定するには流速 $6 B \cdot L_{cm}/sec$ で約3時間は測定する必要があり、また測定尾数について、表3にみられる耐久遊泳時間の個体差について推計的検定を行なった結果、少なくとも10尾についての測定が必要である。しかし、1尾につき3時間の測定時間では多量の測定は困難であり、多量測定を行なうためには、1尾についての測定は30～60分が限度のように思われる。それにしても、この測定基準で耐久遊泳時間に有意差が求められる場合は、水路水の溶存酸素量に明らかな違いがある場合とか、毒性物質が混入している場合などであり、河川水に自然に含有される窒素化合物、リン化合物などが遊泳力にどの程度影響するかを調べることはむづかしいであろう。

なお、多摩川上流、下流の水質差によって耐久遊泳時間に差が生じたのはニジマスだけであったが、これはニジマスが良質な水に生活するという理由の他に、実験に用いたニジマスは実験室内で孵化、生長したもので、天然産のニジマスに比べ遊泳力に乏しいことも起因しているかもしれない。もしそうであれば、人工飼育のニジマスは履歴は明瞭であり、個体差も天然産のものに比べ少ないことも考えられるので、実験生物あるいは指標生物としてテストするのも興味のあることであろう。

次に上記の測定基準に従って、多摩川産ウグイと酒匂川産ウグイ（何れも下流域産）を用いて、河川水（多摩川下流水、酒匂川下流水）による飼育魚と水道水飼育魚とについて耐久遊泳時間の測定を行った。実験魚は3個のガラス水槽に5尾ずつ入れ、水槽のろ過は行わず、エアーストンによる送気だけで10日間飼育した。その結果は表4.5に示される。

表4. 多摩川産（登戸）ウグイの耐久遊泳時間（30分測定）

流速 $40 cm/sec$, 水温 $17 \sim 21 ^\circ C$

実験魚	水道水（脱塩素）飼育魚					多摩川下流水飼育魚				
	1/28	1/29	1/31	2/2	2/6	1/28	1/29	1/31	2/2	2/6
測定日	1/28	1/29	1/31	2/2	2/6	1/28	1/29	1/31	2/2	2/6
飼育開始からの日数	0	1	4	6	10	0	1	4	6	10
実験魚※ No. 1	30分以上	"	"	"	"	30分以上	"	"	25分	0分
No. 2	30分以上	"	"	"	"	30分以上	"	"	15分	0分

※ 体長：No. 1；10cm No. 2；12cm

表5 酒勾川(五百羅漢付近)ウグイの耐久遊泳時間(30分測定)

流速 40~45 cm/sec, 水温 15~16°C

実験魚	水道水(脱塩素)飼育魚					酒勾川下流水飼育魚				
	1/20	1/21	1/23	1/25	2/4	1/20	1/21	1/23	1/25	2/4
飼育開始からの日数	0	1	4	6	13	0	1	4	6	13
実験魚※ No.1	30分以上	"	"	"	"	30分以上	"	"	30分	15分
No.2	30分以上	"	"	"	"	30分以上	"	"	30分	10分

※ 体長: No.1; 10 cm No.2; 13 cm

これらの結果は多摩川産ウグイは飼育6日目ぐらいから耐久遊泳力は弱まる傾向はみられたが、酒勾川産ウグイは6日目までは30分以上の耐久性を示し変化はなく、13日目のテストで耐久遊泳力が弱まる傾向が認められた。このことは、多摩川と酒勾川とでは上流、下流間の水質差は多摩川の方が大きいことを示唆しているとも考えられる。

表6 多摩川(中流)産ウグイの走流行動と視覚運動反応との関係

水温 16~17°C

	走流行動※			視覚運動反応		
飼育水槽水	多摩川下流水			"		
実験水路水	脱塩素水道水			"		
測定日	1/29	2/2	2/6	1/29	2/2	2/6
飼育開始からの日数	1	6	10	1	6	10
実験魚体長 No.1 10 cm	30分以上	25分	10分	30分以上	15分	3分
No.2 体長 12 cm	30分以上	20分	0分	30分以上	10分	0分

※ 流速 40~50 cm/secで30分間の耐久遊泳時間

また多摩川産ウグイについて、走流性(水路の水流40 cm/secに向って泳ぐ遊泳行動)と視覚運動反応(水流の影響は受けず、縞模様の回転40 cm/secだけに刺激されて生ずる遊泳行動)との関係を調べると表6のようで、走流性が弱まると視覚運動反応による遊泳行動も弱まることが認められた。したがって、疲労度を測る指標として視覚運動反応も有効なことが考えられるが、この反応は走流行動よりもさらに個体差は大きいので指標としての精度は高いとはいえない。

表7. 洗剤(商品名ザブ)の影響による魚類の耐久遊泳時間の測定

流速 40 cm/sec、水温 16~18℃

水質 (飼育水) 水路水	飼育水 水路水 とも脱塩素 水道水	飼育水は水道水 約10日間、水路水に洗剤混入 混入割合		水路水は水道水 飼育水に洗剤混入 1日飼育、混入 割合は10ℓに0.05g	水路水は水道水 飼育水に洗剤混入 3時間飼育、混入 割合は10ℓに0.1g
		10ℓに0.1g	10ℓに0.05g		
測定日	1/26	1/30	2/1	2/2	3/4
オイカワ 体長12cm	120分以上	20分	80分	25分	30分以上
ウグイ(2尾) 12cm	120分以上	20分 5分	25分 60分	0分 5分	30分以上
フナ 10cm	120分以上	60分	80分	40分	30分以上
ニジマス 13cm	120分以上	15分	30分	3分	10分

表8. ABS(スルホン酸ナトリウム塩)の影響による魚類の耐久遊泳時間

流速 40 cm/sec、水温 16~18℃

水質 (飼育水) 水路水	水槽水にABSを 10ℓに0.05gの割 で混入、1日飼育 水路の水は水道水		水槽中にABSを 10ℓに0.1gの割で 混入、1日飼育 水路の水は水道水		水道水(脱塩素) で1日飼育 水路水にABSを10ℓ に0.1gの割で混入		
	測定日	2/8		2/24		2/4	
魚種	視覚 運動反応	走流行動	視覚 運動反応	走流行動	視覚 運動反応	走流行動	
フナ (多摩川下流産)	8cm	0分	5分			15分	120分
	8	10分	30分			5分	120分
ウグイ (多摩川中流産)	11	10分	60分 以上	0	5分	5分	20分
	13	9分	5分	0	10分	10分	20分
アブラハヤ (多摩川上流産)	8			0	5分		25分
	10			0	0		40分

60cm円形水路を用いた測定方法の有効性、信頼度をさらに検討するために、飼育水ないし水路水に極端な水質差がある場合について魚の耐久遊泳時間を測定した。実験方法として中性洗剤溶液（商品名ザブ、陰イオン系、弱アルカリ性）、あるいは界面活性剤ABS（分岐鎖型ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム）溶液を希釈して水道水（脱塩素）に混入して、そのなかで魚を24時間飼育した場合と、水道水で飼育した場合とについて測定した。

この結果から、水道水に中性洗剤を添加した場合、溶解量（0.05g/10ℓと0.1g/10ℓ）によって魚類の耐久遊泳時間に差が生じること、またニジマス、ウグイ、オイカワ、フナの順で影響度は大きいことが分った。さらにこの影響度は魚が中性洗剤混入水に3時間あるいは24時間接触した場合でも同じであった。ABSの試験濃度は既往の報告⁷⁾を参考にした。

表9. ABS（スルホン酸ナトリウム塩）を0.1g/10ℓの割で溶解した水道水で測定した最初の実験魚と2回目の実験魚の耐久遊泳時間の比較

流速 40cm/sec, 水温 17~18℃

測定日	魚種	最初の魚		2回目の魚	
		体長		体長	
2/24	アブラハヤ	12cm	0	13cm	30分以上
2/24	アブラハヤ	8	0	13	30分以上
2/27	アブラハヤ	10	23分	12	60分以上
2/28	アブラハヤ	10	10分	12	23分以上
2/28	ウグイ	13	7分	13	30分以上
2/28	ウグイ	10	8分	12	30分以上
2/28	タモロコ	7	30分以上	8	30分以上
3/1	タモロコ	7	20分	8	60分以上

上記の試験で興味があったのは、水路内の水道水にABSを0.1g/10ℓの割で添加した場合、最初の実験魚と2回目の実験魚との耐久遊泳時間を比較すると、表9のようにタモロコの1例では変化はないが、アブラハヤ、ウグイでは2回目の実験魚は耐久遊泳時間が長くなる傾向がみられたことであった。このことは、最初のテストから2回目のテストまでに経過した約1時間の間にABSの濃度に変化が生じたのか、1回目の実験魚による生物的影響が水質に変化をもたらしたのかは明らかではないが、今後検討すべき問題であろう。

また、本研究の計画の1つとして、多摩川魚類と静岡県狩野川魚類との活動力の比較があった。しかし、昭和53年1月14日に発生した伊豆大島近海地震により狩野川上流に流入する持越川にシアン化合物が

流入して、魚類が1万尾以上も死亡浮上するという事故があった。そのため、狩野川調査を一時断念したが、2月9日に採水を行ない、シアンの影響がなお残存しているかどうか、残存しているとすれば本測定方法において、どういう形で魚類の遊泳に現われるかを調べるため、狩野川河川水と多摩川河川水とで飼育した魚類の遊泳力の測定を行った。狩野川の水は大仁橋付近（中流）と清水町徳倉橋付近（下流）から採水した。PH値は中流も下流も7.2であったが、下流水は透視度20cm、やや悪臭も感じられた。実験魚はフナ、アブラハヤ、タモロコ、オイカワ、ツチフキで何れも多摩川中・下流産のものである。

なお、朝日新聞の情報によれば、シアン濃度は1月16日で大仁橋で0.33PPM、徳倉橋で0.29PPMであったが、翌17日には大仁橋では検出されず、徳倉橋では0.10PPMとなり、さらに18日には大仁橋付近ではオイカワ、フナ、アユ、カジカなど10尾前後が生きたまま投網にかかったという。したがって、1ヶ月後の採水時にはシアンの影響はなかったものと思われる。

表10. 多摩川、狩野川河川水飼育魚の耐久遊泳時間の比較（30分間測定）

流速40cm/sec 水温17~19℃、測定尾数各魚種1尾

水 飼育水 質 水路水	水道水(脱塩素)		狩野川水飼育魚				多摩川水飼育魚			
			下流水		中流水		下流水		中流水	
	水道水(脱塩素)		同上		同上		同上		同上	
測定日	2/10	2/17	2/13	2/20	2/13	2/20	2/15	2/22	2/15	2/22
飼育開始 からの日数	3	8	3	8	3	8	3	8	3	8
(多摩川下流産) フナ 体長10~12cm	30分 以上	30分 以上	30分 以上	20分	30分 以上	30分 以上	30分 以上	30分 以上	30分 以上	30分 以上
(那珂川産) アブラハヤ 10~13cm	30分 以上	30分 以上	20分	0	25分	10分	30分 以上	15分	30分 以上	25分
(多摩川中流産) タモロコ 8~10cm	30分 以上	30分 以上	30分 以上	0	30分 以上	0	15分	0	20分	10分
(多摩川下流産) オイカワ 10~13cm	30分 以上	30分 以上	30分	0	25分	10分	30分	20分	30分	20分
(多摩川下流産) ツチフキ 8~10cm	10分	10分	0	0	0	0	10分	0	10分	0

測定結果は表10に示されるように、飼育1日後の測定では多摩川と狩野川飼育魚類の耐久時間には下流、中流の差は殆どみられないが、飼育8日後になると、両者の差はフナを除いてやゝ顕著に示され、多摩川飼育魚の方が耐久遊泳時間は長いことが分った。しかし、その差は毒物の影響によるといい切れるほど大きいものではない。なお、両川とも飼育1日後では下流、中流による耐久遊泳時間差はみられないが、飼育8日後では中流水で飼育したタモロコ、アブラハヤの耐久時間が長くなり、フナではなお両者の違いは明らかでない。

以上の実験結果から、水質差が余程顕著でない限り、本装置による30～60分程度の測定時間内で遊泳行動に変化を求めることはむづかしいと思われる。

3. 二重円形水路による実験

河川の魚類が一定水域に生息してゆくためには、目標を保持できる程度の環境水の透明さが必要である。それは魚類の走流行動は目標を視認して、その目標を網膜に保持しようとする目標走性に依存する部分が多いからである。⁸⁾東京都水産試験場による「多摩川魚類生態調査」^{4) 5)}によれば、多摩川の透視度は春は全体的に16.0～30cmを保ち、比較的澄んでいるといえるが、夏から秋にかけては全流域で低下し、殊に上流で低下し、昭和橋付近でも9.0cmに、永田橋では3.0cmとなっている。透視度の低下が長期にわたる現象であれば、上記のような理由で魚類の生息区域に変化が現われることも考えられる。もっとも、走流性は接触刺激に依存する部分もあるので、視覚が利かなくとも水底や石などに接触しておれば、ある程度一定区域に留まることは可能であるが、それでは十分とはいえないであろう。

このような水の濁度と魚類の遊泳行動との関係は基礎的な問題ともいえるが、魚類の分布や移動あるいは魚類の増減機構を調べる上で極めて重要な要因なので、次の実験を行った。

透視度の変化、すなわち実験水の濁度は関東ローム超微粉(JIS規格、Z8901-1974)により人工的に作り、濁度の遊泳行動に及ぼす影響は視覚運動反応に基づく魚類の遊泳行動の変化をもって測定した。関東ロームは SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 から成る。なお、その混入水(以下、関東ローム水という)は二重水路の外側に入れ、魚は内側水路に入れるので、関東ローム水は直接魚体に觸れることはなく、その成分の魚体への影響はない。外側水路の外壁全体に巡らした黑白縞模様スクリーンは、白いアクリル板に幅1.8cmの黒ビニールテープを5.4cmの間隔で貼ったものである。実験にはアブラハヤ4尾を1グループとして用いた。4尾を一緒に水路に入れたのは魚の活動性を高め、縞模様への追従性を高めるためである。魚が水路中央にいる場合は、魚と縞模様との最短距離は15cmである。縞模様の回転速度は40cm/sec、測定時間は5分間である。5分間の縞模様回転数 N (40回転)、実験魚が縞模様を追従して回転した数 n との比 n/N をもって魚の追従指数とし、この指数で魚の目標視認度を調べた。関東ロームの濃度は5段階に変えた。

表 1 1. 水の透視度とアブラハヤ（那珂川産）の移動目標に対する追従指数

測定日 1 / 30 ~ 2 / 28 , 水温 15~19℃

関東ローム微粉 g	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
ローム微粉濃度 PPM	0	13	26	39	52	65
透視度 cm	30<	24.4	14.7	9.2	7.1	5.7
魚の平均回転数 (5分間)	40.0	40.0	28.2	28.9	14.8	15.0
魚の追従指数	1.0	1.0	0.71	0.72	0.37	0.37

注) 飼育水、水路水ともに脱塩素水道水。

縞模様の回転数は40回/5分

実験魚は1測定に4尾同時使用

追従指数=魚の平均回転数/縞模様回転数

アブラハヤの体長 10~12cm

測定の結果は表 1 1 に示される。同表によればアブラハヤは透視度 14.7cm 以下になると、追従指数は低下することがわかる。さらに透視度 7.1cm 以下になると追従指数は極端に低下する。既述のように多摩川では透視度 15cm 以下になることは夏から秋にかけては珍しいことではなく、このように濁度の高い場合には日中でも遊泳性魚類の走流行動は乱されているものと推定される。

表 1 2 水の透視度と3魚種（フナ、ニジマス、アブラハヤ）の移動目標に対する追従指数

測定日 3 / 13 ~ 3 / 18 水温 19~21℃

魚種	フナ(多摩川下流産) 10~12 cm			ニジマス(実験室飼育) 10~13 cm			アブラハヤ(表 10より転記) 10~12 cm		
	関東ローム微粉 g	0	0.5	2.0	0	0.5	2.0	0	0.5
ローム微粉濃度 PPM	0	13	52	0	13	52	0	13	52
透視度 cm	30<	14.7	7.1	30<	14.7	7.1	30<	14.7	7.1
魚の平均回転数 (5分間)	18.8	18.8	8.8	26.8	6.8	10	40	28.2	14.8
魚の追従指数	1.0	1.0	0.39	1.0	0.24	0	1.0	0.71	0.37

次に魚種別の比較として、ニジマス、フナについて何れも4尾ずつ水路に入れて目標追従性を測定した結果を表12に示す。これらの魚類はアブラハヤに比べ水が透明の場合でも追従指数は悪いが、透視度14.7cmに低下してもフナは追従指数に変化はなく、ニジマスは極端に低下し、透視度7.1cmになるとニジマスでは目標視認がかなり困難になるようであり、フナはなお保持できる。このことはフナとアブラハヤは濁った下流水域でも視覚目標をとり得ること、ニジマスは清澄な水域でなければ目標をとり得ないことを示唆しているものであろう。

4. 2m直線水路による実験

この装置は河川で直接魚の遊泳力を測定する方法であり、河川の流れて沿って水路を水平に設置し、水路内流速は平均で $1 \sim 2 B \cdot L \text{ cm/sec}$ を目安としている。実験魚をこの水路に入れると、魚は最初は流れにさからい流速の速いA区域(図5参照)で泳ぎ、時間経過とともに流れの遅いD区域に下り、最後には疲労状態でD区域のフィルターに接触する。したがって、魚の遊泳力の指標は観測時間における遊泳位置の変化が基準となる。

測定は多摩川の上・中・下流で行った。1尾を水路に入れてから順応時間を10分間とった後、最初の30分について30秒ごとに魚の位置を記録し、次の30分は記録せず魚を水路中に遊泳させ、最後の30分について再び30秒ごとに記録をする。魚の遊泳力は30分における観測回数 $N(60回)$ における遊泳位置の合計評点 P の平均 P/N によって比較し、これを遊泳力指数とした。すなわち、魚が30分間A区域で泳ぎ続けると、この間の遊泳力指数は $2 \times 60 / 60$ で2.00、30分間D区域に滞留すれば1.00である。実験魚の時間経過に伴う遊泳力の減退は最初の30分間と最後の30分間における遊泳力指数の減少率で推定する。

その結果、上・中流の比較的清澄な水域では本装置を用いて遊泳の測定が可能なが分ったが、下流域のごみや付着藻類の多い水域ではフィルターは目づまりを起こし、改良の必要が考えられた。

表13による測定結果のうち遊泳力指数の減少率から、オイカワは中流と下流で遊泳力に差はないこと、アブラハヤは上流より中流で高い遊泳力を示すこと(上流では低水温の影響が含まれるかもしれない)、タモロコは下流より中流で高い遊泳力を示すことが分った。

なお、本装置による測定を精度を高めるのには、今回のように1時間半の観測時間では十分ではなく、60cm円形水路のように1尾について3~5時間の観測を行うことが必要であり、また個体差を考慮し数多くの個体についての測定が必要であろう。また、多摩川上流のように極端に水温が低い場合は、水温の影響も考慮すべきであろう。

5. 1m直線水路による実験

2m直線水路では水路内側に黑白縞模様があり、実験魚にとって明瞭な視覚目標となっている。本装置では河川の石のように背景とのコントラストの弱い物体への目標視認が魚種により、あるいは水の濁度によってどう変るかを調べることを目的とした。このことは、3の二重水路による室内実験の結果を現場で実証することにもなる。

表 1.3. 2 m 直線水路による魚類の遊泳力指数の測定

流域	測定日	測定場所	測定時刻	天候・水温	水路平均 流速 cm/sec	実験魚 (体長) cm	遊泳力指数		遊泳力 指数の 減少率 A-B/A
							A 実験開始 0~30分	B 実験開始 60~90分	
中流	12/10	多摩川 日野橋下	11:00~ 15:00	晴 9℃	14.0	オйкаワ (125)	1.27	0.84	0.43
						オйкаワ (115)	1.13	0.76	0.32
						アブラヤ (100)	1.37	1.12	0.18
上流	12/20	多摩川 昭和橋下	12:00~ 16:00	曇 6.6℃	12.0	ウグイ (75)	1.86	1.13	0.40
						ウグイ (75)	1.51	1.00	0.34
						ニジマス (110)	1.42	1.13	0.20
						ニジマス (115)	1.65	1.44	0.13
上流	12/21	同上	9:50 ~ 13:30	曇 5.7℃	12.0	アブラヤ (75)	2.00	1.45	0.27
						アブラヤ (75)	2.00	1.36	0.31
						タモロコ (95)	2.00	1.64	0.18
						タモロコ (75)	1.99	1.46	0.27
下流	12/24	多摩川 双子橋 付近	10:00~ 14:00	晴 10.3℃	13.3	タモロコ (110)	1.79	1.17	0.35
						タモロコ (95)	1.83	1.17	0.36
						オйкаワ (120)	2.00	1.38	0.31
						アブラヤ	1.41		途中で 脱出

この水路は2 m直線水路と異なり、人為的な目標は定めず、魚が水路側面、底面を通して石のような物体を目標にとることを仮定して試作したもので、その実証のために黒ビニールテープを3本、25 cmの間隔で側壁に貼って比較実験を行った。魚の遊泳力の評価は次のように行った。水路を3等分し、上流のA区域を遊泳している場合の評点は2.0、下流のC区域は1.0、真中のB区域は1.5とし、それらによる評価の方法は2 m直線水路の場合と同様である。魚の遊泳位置の変動性の評価については、30秒ごとに遊泳位置を観測し、A、B、C3区域のうちA→B区域あるいはC→B区域のように隣接区域へ移動したときは0.5、A→C区域、C→A区域へとB区域を通過したときは1.0の評点をつけ、その評点合計を観測回数で除した平均値を位置変動指数とした。したがって、実験魚が観測時間中移動しないときは変動指数は0であり、遊泳区域の変化が激しいときは指数も大きい。

表 1 4. 1 m 直線水路による魚類の遊泳力指数と位置変動指数

実 験 日	3/7 水温 16 PH 7.4				3/14~15 水温 6.2, PH7.2	
実 験 場 所	多摩川中流、日野橋付近				多摩川上流 昭和橋下	
	日野橋下流、20 m		日野橋下流、200 m			
水路内水流 cm/sec	8.5		21.8		20.0	
透 視 度 cm	16		20		30<	
視 覚 目 標 (黒テープ)	無	有	無	有	無	有
オ イ カ ワ 体長 10 cm	1.53	2.00	1.17	1.57		
	0.23	0.0	0.20	0.15		
タ モ ロ コ 8.5 cm	1.90	2.00	1.17	1.27		
	0.23	0.0	0.22	0.11		
ウ グ イ 10~12 cm	1.00	1.95	1.11	1.37	1.40	1.62
	0.20	0.10	0.20	0.17	0.20	0.15
ア プ ラ ハ ヤ 8.5 cm					1.46	2.00
					0.32	0.0

上段：遊泳力指数、下段：位置変動指数

観測は多摩川上流、中流で行った。実験魚はそれぞれの流域で採捕したものである。中流の日野橋のやや下流では家庭排水に混って洗剤の泡立つのが見受けられ、また水の透明度もかなり低下していた。観測結果は表 1 4 に示す。この実験では視覚目標が魚類の遊泳力に及ぼす影響度を調べたのであるが、それは視覚目標別の遊泳力指数、あるいは位置変動指数から示される。すなわち、オイカワ、タモロコ、ウグイについて目標テープの有る方が遊泳力指数は高く、位置変動指数は反対に低いので、透明なアクリル板を透して見る石などよりも黒いビニールテープは目標として効果的なことが分かる。また、黒テープがなくとも魚は水流に容易に押し流されないのは仮説のように水中の石などを視覚目標にしている結果とも考えられるが、水路前面の網地フィルターを目標にしている可能性もある。なお石あるいはフィルターの何れを目標にしているかは分離し難いが、水路のなかに直接石を数個入れると、魚は水路前面のフィルターより石に対して定位する行動が明らかに認められた。

このように、河川の魚は石あるいは水草などを目標にとることは考えられるが、魚の目標の視認度は水の透明度と関係があり、水中の濁度が高ければ目標視認がむづかしくなることは、表 1 4 における上流と中流におけるウグイの視覚目標のない場合の遊泳力指数の比較で明らかである。このことは二重円形水路による実験でも確かめられており、1 m 直線水路による実験を河川の種々の条件下で実施することにより、河川の濁度と魚類行動との関係を明らかにすることができよう。

V 考察及び今後の問題点

本研究では5種類の装置により、河川の水質差による魚類の遊泳力、あるいは遊泳行動の違いを調べた。その結果、結論的には毒性物質の高濃度の混入のように明らかな水質差がある場合には、魚類の遊泳力をもって汚染指標とすることができるが、河川の上流、下流というような自然条件下の慢性的な水質差を比較するのには、今回採用した測定方法では即決的な差を求めることはむづかしいものと思われる。しかも、毒性物質流入のような急性汚染に対しては工場排水試験方法が既に確立し、例えば本研究でも行った洗剤の影響を調べる場合などに用いられている。⁹⁾したがって、本研究では飽く迄も慢性的な汚染度の違いを魚類の遊泳力をもって判定することが目的の一つである。

その目的に副う実験方法の一つとして、試水による飼育魚の遊泳力を円形水路で測定することを試みた。そしてヤマメ、ニジマスのような清流に生息する魚では、多摩川及び近接河川(酒匂川、狩野川)の上・下流水に接触させた場合、6~8日後に遊泳力に差が現われることが分った。しかしこの実験方法では試水の運搬、保存、水路への給水などの過程で、あるいは水槽のろ過を行なうことにより水質に変化を生ずるなどいくつかの問題があり、しかも試験開始後6~8日以後でなければ結果が判明しないことからみても、効果的な方法とはいえない。また、この方法ではオイカワ、ウグイ、フナなどでは水質差の影響をはっきりと示さない。しかし、円形水路の測定実験を通して、従来は分布域からフナ、オイカワは汚染に強い魚種であり、フナはオイカワよりさらに強いといわれていた⁵⁾ことが実証された。

目的の範囲内の実験方法として、最も精度が高いのは河川における2m直線水路測定法であろう。この装置の問題点は浮漂物によるフィルターが目づまりと、水路内水流の低速性であるが、この2つの問題点は次のように改良できよう。例えば、フィルターの主目的は魚の逃避防止であるから、微細なゴミは通過させ、魚は逃がさないようなろ斗式のフィルターを用いること、水流の低速性はポンプによる補助水流を水路に補ぎなうことにより解消されるものと考えられる。また、実験魚としてはニジマスのように環境を厳密にコントロールして飼育した体長一定で、なるべく小型のテストフィッシュを人工飼育・管理することによって、遊泳力の個体差を少なくすることのできる魚種を中心に用いるのが効果的であろう。

二重円形水路と1m直線水路によって測定された濁度と遊泳行動との関係は、やゝ目的外の実験ともいえるが、魚類の分布に関する基本的な問題であり、今後も追究すべきであろう。国分寺市を流れる野川(多摩川支流)ではヒゴイを放流しているが、朝日新聞(昭和51年1月31日)によると、これらのヒゴイは全体的には少しずつ下流に向っているが、川の水が比較的澄む早朝には上流に向うことが述べられている。この移動のしくみのなかには濁度と目標視認の関係が含まれているように思われ、ヒゴイの放流効果を高めるためには、川の濁りをできる限り低く押えることが必要であろう。

中村¹⁰⁾は昭和51年に行った多摩川系魚相調査で、昭和49年の都水試の記録と比べ、著しく変わったのはウグイの分布であることを述べ、昭和49年にウグイがその下限と思われる関戸橋を越えて丸子橋まで達したのは、同年8月の集中豪雨による異常増水を原因の一つにあげている。これは増水による流速の増加と共に水の濁りも大きい原因となっているであろう。そして水の濁りの影響としては上記の目標視認の難易が大きくかかわっているものと思われる。

VI 要 約

本研究では円形水路3種、直線水路2種の計5種類の装置を用い、多摩川を中心に河川の水質差による魚類の遊泳力、あるいは遊泳行動の違いを調べた。得られた結果は次の通りである。

1)多摩川、酒匂川、狩野川から採水、運搬した試水を実験室の水槽に入れ、多摩川、酒匂川で採捕した数種の魚(ウグイ、タモロコ、ヤマメ、フナ、アブラハヤ)と人口飼育のニジマスをその水槽で飼育し、1~13日間の遊泳力の変化を調べた。何れの河川でも、何れの魚種でも飼育開始6日目までは、上、中、下流の試水による飼育の影響は認められず、多摩川の試水では6日目以後にヤマメ、ニジマス(溪流生息種)の遊泳力に上流水と下流水とで差が現われた。酒匂川のウグイでは13日目ぐらいに、上流水と下流水の差が、狩野川の試水で飼育したアブラハヤ、タモロコ、オイカワでは8日目に中流水と下流水の差が現われた。フナは多摩川、狩野川で流域の水質差による遊泳力の変化はみられなかった。

2)洗剤、界面活性剤ABSを脱塩素水道水に0.1g/10ℓの割合で混入した水を水路の水に使用した場合、遊泳力の変化はフナ、オイカワ、ウグイ、ニジマスの順で少ないことが示された。この結果は30分間の測定から得られ、水質に毒性の有無といったような極端な差がある場合には遊泳力の変化をもって即時的に水質を判定できることが分った。

3)濁度と遊泳行動との関係がアブラハヤ、ニジマス、フナについて求められ、ニジマスは透視度約15cm以上でないと目標視認は困難であり、フナは透視度5cmぐらいでも目標視認は可能であり、アブラハヤはその中間にあるようである。

4)河川での現場測定には2mの直線水路が使用された。測定開始からの30分間と、測定開始60分後からの30分間との魚の遊泳力の比をもって遊泳力の減少率とした。この方法でオイカワは中流と下流で遊泳力に差はないこと、タモロコは下流より中流で高い遊泳力を示すことが知られた。なお、この方法の精度は多量測定によって高めることができるが、そのためには水路の水流を速めるなどの工夫が必要であることが分った。

謝 辞

本研究の実施に当り、川崎河川漁業協同組合、酒匂川漁業協同組合、神奈川水産試験場、東京都水産試験場の皆様の御協力を得、実験に際しては東京水産大学漁法学研究室の学生諸君の援助を得た。ここに記して心から感謝の意を表する次第である。

引用文献

- 1) 日本生態学会環境問題専門委員会編：環境と生物指標2—水界編—、生物指標としての魚類(水野信彦)、190~196、共立出版(東京)、1975。
- 2) INOUE, M: Observation on the swimming speed of fish in an annular trough - I. Effect of visual screen on goldfish. Bull. soci franco - japonaise d'océano. 13(2), 1975.

- 3) JONES, F. R. H. : The reaction of fish to moving background. J. Exp. Biol., 40, 437-447, 1963.
- 4) 東京都水産試験場：多摩川の魚類生態調査Ⅰ。昭和48年秋及び昭和49年冬における調査結果について、1974.
- 5) 同 上：多摩川の魚類生態調査Ⅱ。昭和49年度の調査結果及び総合解析について、1975.
- 6) BAINBRIDGE, R. : The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat. J. Exp. Biol., 35, 109-133.
- 7) 菊地幹夫・井上瓦：洗剤に関する研究Ⅰ—陰イオン界面活性剤の河川水中での生分解—。東京都公害研究所年報, 第7巻, 1976.
- 8) 田中良久：動物心理学, 共立出版(東京), 1956.
- 9) 若林明子・菊地幹夫：界面活性剤の水生物に対する影響, 遺伝7月号, 1976.
- 10) 中村守純：多摩川水系魚相調査, 昭和51年度都市河川汚染実態調査報告書2, 財団法人とうきう環境浄化財団, 1977.

今後予想される効果

本年度の調査は測定方法を中心に実施した。その結果、河川の水質と魚類の活動力との関係を調べるのに最も有効、適切な方法は、直線型水路を固定し、試験魚をそのなかで疲労の生じるまで遊泳させることである。その場合、河川の流れをそのまま使用したのでは魚の疲労は容易に生じないので、人為的に水路の流速を附加させる工夫が必要となる。流速1 m/secが得られれば、ウグイ、タモロコノ類でも1時間前後の観測で、ある程度水質の影響が遊泳行動に反映されるものと思われる。但し、精度を高めるのには同一種について10尾の測定は必要であろう。

河川の濁りと魚類の分布との関係については、視覚の面から調べる必要があり、本研究では実験室段階でその関係の密接なことを示した。その結果、河川における魚類の行動の観測では標識魚(無線標識なども含める)を利用し、濁度との関係を調査することにより、興味ある結果が得られることが分った。

多摩川の環境と魚類の活動性に関する研究 —汚染の指標としての活動力の測定—

研究代表者 井上 実

I 目 的

本研究は河川の汚染状態を調べる一つの方法として、魚類の活動力を用いることができるかどうかを実験的に調べることに、及びその研究と併用して多摩川の水による魚類の活動力の測定を行ない、多摩川の環境と魚類の活動性の関連を調べようとするものである。

従来、魚類に対する毒物の急性致死試験は毒物のTL_m(50%致死環境濃度)を求めるバイオアッセイ(生物検定)が一つの標準方法となっている。この方法で河川の汚染濃度を調べるのには、汚染物質の毒性が高く、急性である場合は有効であるが、慢性的な河川の汚染の度合の比較には不適當である。

また、このようなバイオアッセイ以外に、河川に棲む魚類や魚類個体数の増減、あるいは分布の変化を河川の汚染度の目合にすることがある。この方法にもいくつかの問題点があり、魚類の採集の定量化がむづかしいこと、魚と環境との対応の複雑さ、あるいは河川間で魚類相が異なる上、漁法の違いなどがあることから、この方法で河川汚染度を検討することは余り意味がないとされている。

本研究では初年度に河川水による魚類の活動力の変化を汚染指標として使うことの可能性を調べるため、魚類の活動力をその遊泳力をもって表わし、遊泳力は最大遊泳速度あるいは耐久遊泳時間をもって測定することを試みた。魚類の遊泳力に関係する内部的、外部的要因はさまざまであるが、そのうちで水質は極めて支配的な要因になることは当然考えられる。もとより魚類の遊泳力の測定に高精度を要求することは困難であるが、水質差が顕著である場合には実験魚の遊泳力の変化をもって汚染度を示す指標とすることが可能であると思われたからである。そのため、昭和52年度は魚類遊泳力の測定装置、測定方法につき種々検討した。その結果、界面活性剤などの毒物による急性汚染に対しては、即時的に判定できたが、河川の流域間、あるいは河川間の比較では試水による数日間の飼育という過程が必要であり、即時的に汚染度の違いを明示することは困難であった。また、初年度の研究を通して、最も重要な課題として残されたのはテストフィッシュとすべき魚種の選定であった。

昭和53年度の研究はテストフィッシュの選定から開始された。テストフィッシュの条件は、紡錘形の遊泳力の大きい魚で、環境水の汚染に敏感な魚ということで、河川上流に棲むマスを対象とした。しかし、実験の過程で、群れの密集度を判定の基準にすると効果的なことに気付いたので、上記の条件に加え群性の強い魚種を選ぶこととした。そのため、ウグイ *Tribolodon hakonensis*、アブラハヤ *Moroco steindachneri*、カワムツ *Zacco temmincki* で比較検討した。その結果、流水中ではカワムツが群れとして最も整い、また一定の位置を保持する安定した成群行動をとることが判明した。さらに環境水として多摩川の水を使用したところ、流域の違いに基づく水質差によってカワムツの群れの分散度の違いが即時的に示された。また界面活性剤ABSの混入濃度差による水質の違いによってもカワムツの群れ分散度に

影響が認められた。したがって、カワムツの回流水槽中での群れ分散度（あるいは密集度）は水質の判定に有力な手掛りになるように思われたので、この点に焦点を合せて実験を行った。

II 実験魚

実験に使用した魚種はカワムツ、ウグイ、アブラハヤである。カワムツは熱帯魚店が関西から入手した約1,000尾、アブラハヤ、ウグイは多摩川産あるいは近隣の河川産のものでそれぞれ約500尾である。これらは測定ごとに熱帯魚店から100尾ぐらいつつ入手し、ガラス水槽（60×45×45cm）に魚種別に分けて10日以上飼育したものを実験に使用した。実験時の体長はカワムツは5～7cm、アブラハヤ、ウグイは7～9cmであった。

これらの魚種を群れとして実験に供する場合は3尾を一群れとした。一群れを3尾としたのは水路の幅が10cmなので、カワムツ、その他の魚が横に並んだ場合、3尾が限界であり、縦に並んだ場合も、各個体の動きを瞬間的に視認できるのは3尾が限度であるからである。

III 実験装置・方法

回流水槽の概略は図1のようで、昭和52年度の助成金で作成したものである。昭和52年度はこの水槽を60cm円形水路と称した。アクリル製の円形水路（幅10cm、高さ15cm、最大直径60cm）に高さ約1.27cmまで水を入れると、水の容量は20ℓとなる。水路が $\frac{1}{2}$ 馬力のモーターの駆動によって回転を始めると、水路のなかの水も動き始め、約1分後には定速の水流が得られる。水路の回転速度Vと流速vとの関係は $v = 0.9V$ で、流速は減速装置により20～50cm/secの範囲で変えられるが、本実験では実験魚の体長（B・L）の約3倍の速度、すなわち約3B・Lcm/secの流速とした。

水路の実験魚に水流方向に対して定位行動をとらせるためには、視覚目標が必要であるから、水路をとり巻く白色の円形アクリル外壁（図1）に黒ビニールテープ16本（幅1.5cm、高さ10cm）を等間隔に貼り視覚目標とした。この外壁は水路を回転しても移動しない。予備実験では水路外壁を8等分するようにテープを8本貼ったが、その間隔が広く、実験魚は水流に対しやや流される傾向がみられた。16本にすると、実験魚、特にカワムツはかなり良く水流に定位できるようになった。さらに、円形外壁の内側にも黒テープ2本を対応する位置に貼った。これは魚を一定点で泳がせる方法を検討した結果、魚は両眼に相称の刺激を得る状態で、もっとも固定位置での遊泳行動を長く持続することが明らかになったからである。この位置を固定点と呼ぶ。

実験魚3尾による群れの分散度は次の方法で調べた。水路を斜め上方から観察したとき、3尾とも2本のテープの間、すなわち外壁の1区画（長さ12cm）の中におれば分散値0.5、3本で占められた2区画に先頭魚と最後尾魚が離れておれば分散値1.0と評点し、先頭魚と最後尾魚の間隔がもっとも広がった場合を8とした。30分間の観察時間で30秒ごとに3尾の拡がりを記録し、分散値の合計を観察数60で除した値を分散度とした。

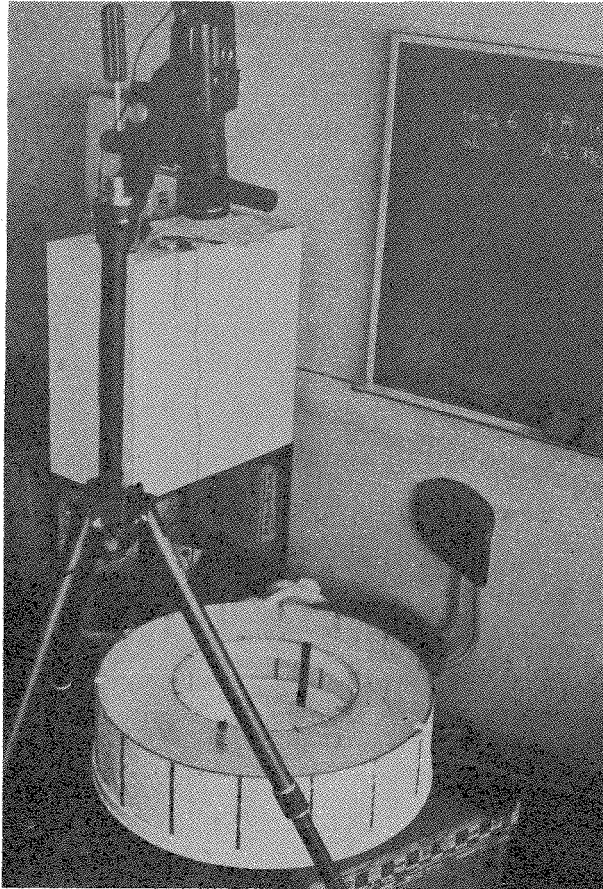


図1 回流水槽と魚群行動撮影装置

実験に際しては飼育水槽から水路に魚を移し、20分以上順応時間を置いた後、水路を回転して水流を与える。この水路は開放型であり、空気との接触による酸素補給と魚の遊泳に伴う酸素消費とが行われるが、体長6cmのカワムツ3尾を2.4cm/secの水流で30分間泳がせた場合、収支のバランスは0.2mg/ℓほど消費が大きいことが示された。実験魚は連続2回以上の観測には使用しなかった。

水路は40Wの白色蛍光灯1本で1m上方から照明したが、実験時刻は魚のバイオリズムを考慮して、10～15時まで行った。

多摩川からの採水及び実験は昭和53年8月～昭和54年3月までの期間行ない、回流水槽による実験は採水後2、3日後に終了した。採水地点は上流として羽村堰上流500m、中流として多摩川住宅付近（調布）、下流として丸子橋上流読売グラウンド下流100mで行った。これらの地点では水温とPHの測定を行った。

IV 結 果

実験1. 3魚種の群れ分散度

カワムツ、アブラハヤ、ウグイを用いて流水中の群れ分散度の比較を行った。

1魚種について、ほぼ同体長の3尾を1群れとして水路に入れ、静水中での群れの分散度を観測した。使用した水は水道水20ℓで、含有する塩素はチオ硫酸ソーダで脱塩した。流水中では魚の群れは水を流してから1分ぐらいで走流行動をとり、ほぼ纏って泳ぎ、特にカワムツは固定点の数cm後方で整然と群泳するのがみられた。アブラハヤ、ウグイでは最初は固定点に留まっていたも、間もなく前進遊泳をとることが多く、また、ときには後退することもあり、各個体の纏り方もまちまちで、群れの統一性はカワムツほど顕著ではなかった。その結果は表1からも明らかであり、静水中ではウグイ、アブラハヤの方が群れの分散度は低く、各個体は纏っているが、流水中ではカワムツの方が分散度が低く、群れの密集性が高いことがわかる。

これは、どのような魚種でも群れ形成には仲間に対する視覚的な接触作用が必要であることはいふまでもないが、流れという刺激が加わった場合、水圧に対する側線感覚を優先して走流行動をとる魚種と、視覚目標に対する定位行動で走流行動を保持する魚種に分れるように思われる。前者はアブラハヤ、ウグイ、後者はカワムツであり、前者では流れのなかで群れを作る仲間への視覚的接触は後者の場合より少ないものと推察される。この考えの妥当性を確かめるため、水路をとり巻く視覚目標をとり除き、水路外側を白色の外壁で蔽い、可能な限り視覚目標をなくし、仲間に対する視覚依存度を高めるような環境を作り、上記と同じ実験を行った。その結果を表1に併用する。

表1. 3魚種の群れ(3尾)の分散度の比較

魚種	項目	実験日	水温 °C	分散度
アブラハヤ	静水	10/2	20	2.31
	流水	10/2	20	2.63
	視覚目標なし	1/5	15	4.00
ウグイ	静水	10/13	20	1.74
	流水	10/13	20	2.52
	視覚目標なし	1/5	15	3.06
カワムツ	静水	10/13	20	3.26
	流水	10/13	20	1.35
	視覚目標なし	1/5	15	1.74

表1によると、アブラハヤ、ウグイは流水中で視覚目標のある場合に比べ、極めて大きい分散度を示した。一方、カワムツは視覚目標のある場合に比べ大差のない分散度を示した。このことはカワムツの流水

中の群れ形成における仲間への視覚依存度の高いことを肯定せしめるものであるが、なお詳細に検討するため単体での実験を行った。

ウグイとカワムツ各10尾ずつを実験魚に用い、1尾ずつ水路に入れ、視覚目標のある場合とない場合について、水流中での20分間の走流行動を調べ、その行動を水流中を前進するもの、後退するもの、一定点に留まるものとに分けた。その結果は表2のようで、視覚目標の有無にかかわらず、ウグイは流れを前進する行動をとるものが多く、カワムツは一定点に留まりながら走流行動をとるものが多かった。

表2. カワムツ・ウグイの1尾のときの走流行動

走流性	項目 魚種	視覚目標なし		視覚目標あり	
		ウグイ	カワムツ	ウグイ	カワムツ
流れを前進		5	3	8	4
流れに定位		3	4	2	5
流れに後退・従流		2	3	0	1
合計		10	10	10	10

本来、魚類の走流性は視覚の他、側線感覚、接触感覚などの機械的感覚に支えられたもので、ウグイのようにカワムツに比べ上流に棲む魚は走流性は発達し、それらの魚種では視覚、機械的感覚の何れも発達しているが、流れが直接体に接している場合は機械的感覚が優先するかもしれない。一方、カワムツのように水流の弱い水域に棲む魚は、速い水流に抗して泳ぐためには視覚への依存度が高まり、仲間相互に対して目標をとり密集して泳ぐ必要があると考えることができよう。

この3種の魚類の流水中での群れ行動をさらに詳細に比較するために、河川における行動を観察した。図2に示す装置を作り、羽村堰上流及び奥多摩昭和橋付近で観察実験を行った。これらの地点を選んだのは、できる限り清浄な水を使うためである。水路中の水流は約25 cm/sec(実験魚の体長の約3倍)になるようにして、視覚目標をとりにくい白色水路と視覚目標をとりやすい透明水路とを流れに設置し、単体と3尾の群れについて観察した。水路の前端と後端には魚の脱出を防ぐフィルターを入れた。

カワムツが単体の場合、視覚目標をとりにくい白色水路では水路後端に流されて走流行動を示さず、一方、ウグイ、アブラハヤでは両者とも水路前面のフィルターによって水流の変化する位置で泳ぎ続けた。これはウグイ、アブラハヤでは機械的感覚に基づく走流行動が発達しているためと推察された。3尾の群れではカワムツは水路後端でよく纏って流れに向かって泳ぎ、ウグイ、アブラハヤは水路全体を使い各個に泳ぐ行動が多かった。

透明水路では、単体でも群れでも3種の魚にそれ程違いはみられなかったが、カワムツの方が纏りのよいのは明らかであった。

この観察の結果から、カワムツは視覚に依存する走流行動をとり、ウグイ、アブラハヤは視覚目標がない場合でも機械的刺激によって走流行動がとれるものと推察された。ウグイ、アブラハヤでは各個体への

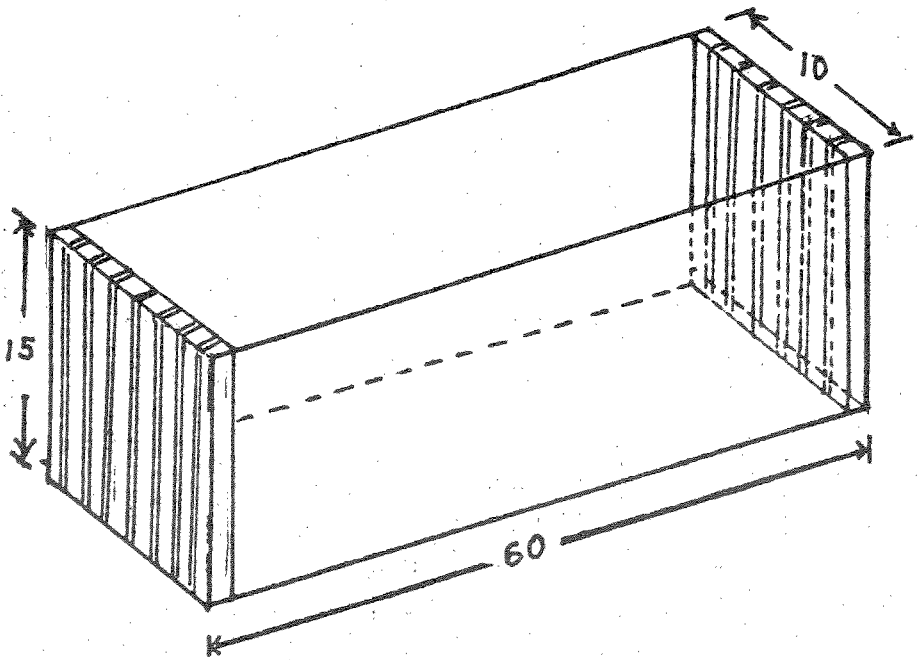
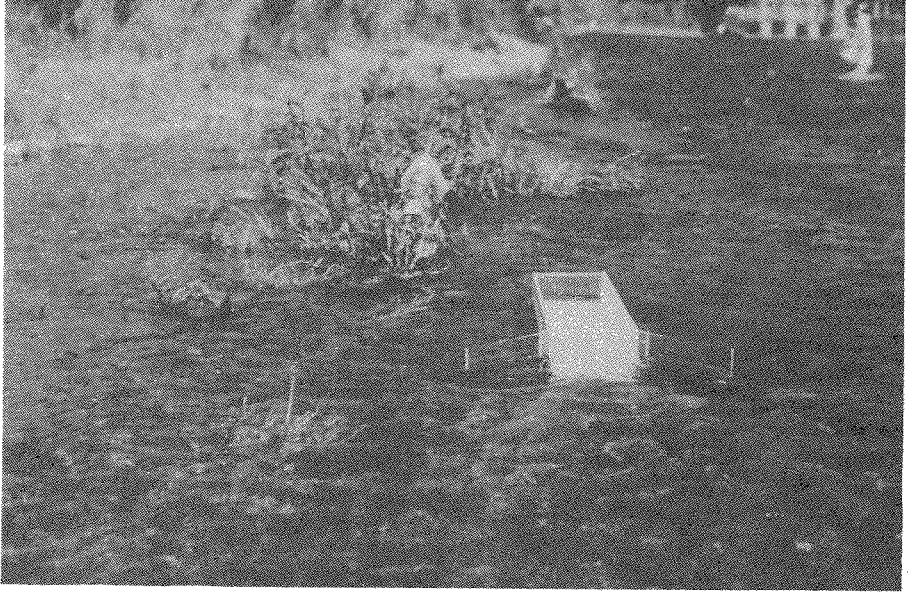


図2. 魚の群れ行動観察用直線水路(単位cm)

白色アクリル及び透明アクリル板の2水路

視覚的依存度はカワムツより小さいためか、群れの分散は比較的大きかった。

実験 2. 河川水と群れ行動

流水中のカワムツの統一ある行動が水質によって変化するかどうかを調べるため、多摩川の上・中・下流の3ヶ所の河川水を採水して群れの分散度を測定した。採水地点についてはⅢ、実験装置・方法の項で述べた。採水地点では40ℓのポリエチレンタンクに採水するとともに、酸素ビンに溶存酸素を固定して実験室に運び、溶存酸素量DO値を測定した。採水は10、11、12、1月の各月の下旬に1回ずつ行った。Winklerの方法によるDO値とPH値は表3のようで、上・中・下流ではっきりした差を示す。

表3. 多摩川の採水3地点におけるPH, DO値

流域	測定項目	採水日			
		10/27	11/24	12/22	1/14
上	PH	7.4	7.4	7.6	7.6
	DO mg/ℓ	10.55	11.27	9.70	11.30
	水温 ℃	17.0	14.0	8.6	7.0
中	PH	7.0	7.2	7.2	7.2
	DO mg/ℓ	7.52	7.90	7.03	11.30
	水温 ℃	19.0	14.0	13.4	7.2
下	PH	6.2	6.4	6.4	6.4
	DO mg/ℓ	3.50	3.60	4.88	5.55
	水温 ℃	19.5	17.0	14.0	12.0

これらの3地点の環境水によるカワムツの群れの分散度は表4のようで、上流水による群れの分散度は1.00～1.48の範囲で平均値1.29で、これは表1にみられる水道水による群れ分散度1.35より低値である。中流水では1.32～2.42の範囲で平均値1.57、下流水では2.25～4.20の範囲で平均値2.87で、下流になるほど群れ分散度は大きくなる。分散分析による統計的検定でも流域間の差は危険率5%で有意である。

下流水ではカワムツはどの場合でも観測を開始してからは10分後に、少なくとも1尾は群れから離れて後退して泳ぐか、あるいは水流とともに流される行動を示した。さらに20分後には2尾あるいは3尾とも流れに抗し切れずに流れに流されて回転することが多かった。

下流水では混入物が多く、水路に水を入れてしばらく放置しておくとし沈殿し、さらに水路を回転し水を流すと、沈殿物は次第にふえ、水路とともに沈殿物が回転するのが目立つ。中流水では静止状態では沈殿は生じないが、水流の回転によって沈殿は生じ10分ほど経つと水路低面にはっきりと沈殿物が認められ

表 4. 多摩川の流域別のカワムツの群れ分散度

採水回数	測定日	流域	群れ分散度
1	10/18	上	1.44
		中	1.46
		下	2.60
	10/29	上	1.00
		中	1.32
		下	4.20
2	11/25	上	1.35
		中	1.38
		下	2.37
	11/27	上	1.01
		中	2.42
		下	2.78
3	12/25	上	1.48
		中	1.38
		下	4.14
	12/26	上	1.39
		中	1.80
		下	2.25
4	1/16	上	1.36
		中	1.40
		下	2.80
	1/17	上	1.22
		中	1.64
		下	2.46
平均	上	1.28	
	中	1.60	
	下	2.92	

るようになる。これらの沈殿物は顕微鏡観察によると珪藻が中心であり、魚の糞も混ざることもあった。上流水では糞以外はほとんど沈殿は生じなかった。このように沈殿物の生じる中・下流では沈殿物の視覚

※) 的影響すなわち移動物体へのカワムツの視覚運動反応によって沈澱物の移動に同調して反走流性を示すことを考慮する必要があり、次の実験を行った。

水路をとり回く縦縞の視覚目標はそのままに、沈澱物の代りに視覚目標として1cm²の黒色ビニールテープの切片を水路底面に縦縞の位置の16ヶ所に貼る。側面の縦縞は移動せず、底面の黒いテープの切片だけが水流と同方向に移動するので、もし水路の中の実験魚が側面の縦縞に注目せず、また水流に対して機械的感覚が作用しなければ、魚は底面の切片の移動に対し視覚運動反応を起して、その移動に対して追従し、水流に対しても従流することになる。

環境水として水道水を入れ、カワムツ3尾の群れ分散度を調べると、表1に示した1.35にほぼ同じ群れ分散度を示したので、底面物体への視覚的影響はないか、縦縞に比べそれ程顕著ではないと考えられる。

したがって、多摩川の上・中・下流水によるカワムツ群の分散度の違いは環境水の水質の影響と考えられ、それは表3に示したDO値、PH値と関係があるものと思われるが、本研究ではこれ以上の水質分析は行っていないので、その正確な原因については明らかでない。

なお、この実験では同一日に採水してきた上・中・下流の水を環境水として使用する場合、実験魚3尾は3種の試水を通じ同一群を使用した。それは試水を取り代えるたびに実験魚群を代えるより、同一群で測定した方がより正確な値を得られることが次の予備実験で知られていたからである。

環境水として水道水20ℓを水路に入れ、次に実験魚群3尾を入れ30分間の順応時間を置く。30分後に水路を回転して水流を流す。数分後に実験魚が整然として群れを保って泳いだ場合はそのまま観測を続けるが、実験魚のうち1尾でも走流行動を示さないもの、あるいは群から遅れて泳いでいるものがいた場合は、それらを新しい魚にとり代えた。そして再度30分間の順応時間を置いた後、観測を開始し、群れが保持されている場合は30分間の観測を続ける。第1回の観測終了後、静水中で1時間の休息を与えた後、第2回目の観測を30分間行ない、さらに1時間の休息を置き、第3回目の観測を行なう。

実験魚を測定ごとに代える場合も、30分間の順応後の予備実験で群れを作らない個体があった場合はとり代えた。この2つの場合の比較は表5のようで、3回の観測を同一群で繰返し行った場合の方が、観測1回ごとに実験魚をとり代えた場合より、群れ分散度の平均値及びその標準偏差は小さいことが認められた。この結果から、30分間を体長の3倍の流速に抗して泳がせる測定を1時間の休止を置いて3回繰返しても魚体の疲労はなく、むしろ測定を繰返すたびに分散値は小さくなることが知られた。これは環境に順応することの影響が加わっているからかもしれない。

※) 視覚運動反応は、動物の視野にある目標が動くとき、これを網膜上の一点に留めようとするために生ずる動物の移動反応である。実験的には白・黒のシマ模様を画いた回転ドラムに対する動物の眼、あるいは体全体の反応でその有無、強弱を調べる。

表5. 測定の繰返しによるカワムツの群れ分散度

実験 回数	測定ごとに魚群をとり代える			3回の測定を同一魚群で 繰返し行なう		
	I	II	III	I	II	III
1	1.16	1.05	1.49	1.28	1.20	1.25
2	1.13	1.02	1.19	1.30	1.14	1.10
3	1.58	1.69	1.58	1.15	1.10	1.10
4	1.46	1.23	1.38			
5	1.32	1.77	1.55			
平均	1.33	1.35	1.43	1.24	1.14	1.14
標準偏差	0.192	0.346	0.158	0.081	0.050	0.086

実験3. 界面活性剤ABSの影響の測定

カワムツの群れ分散度が水質によってどう変化するかを詳細に調べるため、界面活性剤ABS（分岐鎖Dデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム）を用い、その濃度を0（対照）、2.5、5.0、10.0、15.0、20.0mg/ℓの5段階に変えた試験水により群れ分散度を測定した。なお、水路の水温は一定に18℃に保った。

ABSを脱塩素水道水20ℓに混入する。この実験では、まずカワムツ3尾を20ℓの水道水を入れた水路に入れ、統一した群れ行動をとる個体を選び出す。すなわち、3尾のうち走流性の弱い魚、あるいは群れから離脱する行動を示す魚がおれば新しい魚ととり代えて観測を継続し、1.30以下の分散度を示す群れを選び出す。こうして選択した3尾をABS混入水による測定に供するのであるが、水道水（対照）による第1回目の測定とABS混入水による第2回目の測定による疲労の影響は、1時間の休息を与えれば無視できることは既に表5で知られている。

実験では対照実験の終わったカワムツ群を水槽に一旦移し、実験水をABS混入水に代え、次に同じ群れを水路に入れて1時間放置した後、水路を回転して測定を行なう。ABSの各濃度に対する群れの分散度は表6のようである。なお、比較のためABS混入水による単体の走流性喪失までの時間を観測時間30分を限度として調べ、各濃度に対する耐久時間を3尾の平均値をもって表7に示した。

表6. ABSの混入濃度別によるカワムツの群れ分散度

ABS濃度	対照 (水道水)	ABS混入水	水温	備考
2.5 ppm	1.12	1.20	18.0	
	1.25	1.36	17.0	
5.0	1.21	1.54	18.0	
	1.30	1.61	18.0	
10.0	1.00	2.45	18.5	
	1.30	1.80	16.0	
15.0	1.20	3.65	18.5	
20.0	1.20	4.00 以上	18.5	3尾とも15分間に走流性を失う

表7. ABSの混入濃度別によるカワムツ単体の走流性喪失までの所要時間

ABS 混入濃度	A B S 混 入 水	水温
2.5 ppm	30分以上	18℃
5.0	"	"
10.0	"	18.5
15.0	23分(15、28、26)	"
20.0	18分(15、18、22)	"

表6から、ABSの影響が群れ分散度に明らかに現われるのは5mg/lからであるが、2.5mg/lでも影響はうかがわれる。またABSの濃度に比例して群れ分散度が高まることも知られる。また、表7から15mg/lでは単体でも30分以内に走流性を失ない、群れ(表6)でも集団を保持することが困難になるほど強い影響を受けることがわかった。

以上、実験2、3により回流水槽におけるカワムツの群れ分散度から水質の影響を調べることは可能であると考えられた。なお、この方法が一般的な方法として水質検査に利用されるかどうかを調べるため、今迄この実験に関与しなかった学生に依頼して、同じ手法によりABS濃度別試水による群れ分散度の測定を行った。その結果は図3のようで、ABS混入度が2.5mg/lと5mg/lの間では差は明らかでないが、10mg/lでは群れ分散度は大きく全体的にはABSの濃度に比例してカワムツの群れ分散度は大きくなることは認められた。

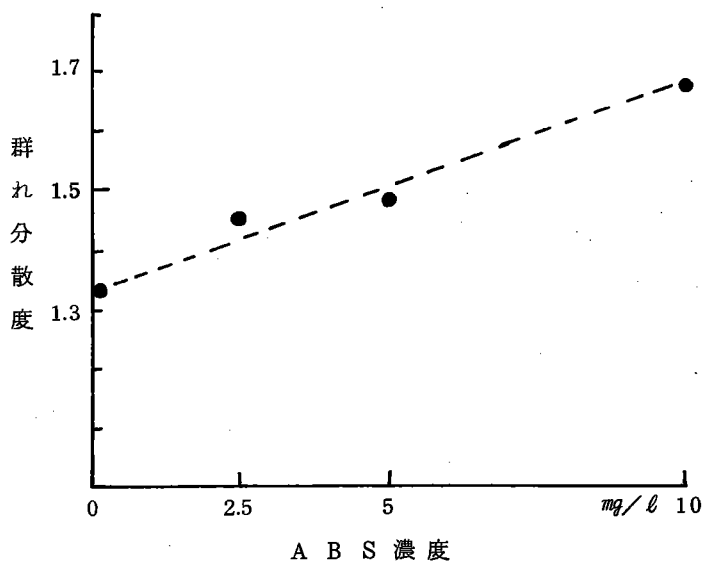


図3. ABS濃度と群れ分散度

実験 4. 群れ分散の光学的測定

水質の変化によるカワムツの群れ分散の原因を調べるため、ムービーカメラを水路上約 2 m の高さに設置し、群れの遊泳状態を撮影し、そのフィルムから魚の尾鰭の振動数と振幅を測定した。実験魚は体長 7 cm のカワムツ 3 尾を 1 群れとし、試水の水温は 18℃ とした。試水は脱塩素水道水と ABS 混入水 (10 mg/ℓ) で、流速は 2.4 cm/sec (3 B · L cm/sec) である。

解析に用いたフィルムは測定開始後 5 分及び 6.5 分経過後のもので、約 20 秒連続撮影したフィルム、(200~300 コマ) である。使用したカメラはフジスコープ MX70、撮影スピードは 1 秒間 18 コマで、映写速度をスローにすることにより尾鰭の振動数 (回/秒) を数えることが可能であった。また、尾鰭の振幅はスクリーン上に紙をあて、1 コマずつ魚像を写しとり、その中の最大振幅をノギスで測り、その魚体の全長 (B · L) の何倍になっているかを計算した。これを 1 群れを形成する 3 尾について測り、その測定値及び平均値を表 8 に示した。

表 8. 水道水と ABS 混入水によるカワムツの尾鰭の振動数と振幅

経過時間		水道水		ABS 10 mg/ℓ 混入水	
		振動数 回/秒	振 幅 ×B·L	振動数 回/秒	振 幅 ×B·L
5 分	測定値	4.0、3.6、3.8、	0.139、0.153、0.126	4.1、3.8、3.8、	0.135、0.125、0.160
	平均	3.80	0.136	3.90	0.140
6.5 分	測定値	3.8、3.5、3.8、	0.132、0.156、0.128	3.4、3.3、3.7、	0.177、0.160、0.182
	平均	3.70	0.142	3.50	0.173

水道水では測定開始後 5 分及び 6.5 分経過後のカワムツの尾鰭の振動数にはほとんど差はないが、振幅は 6.5 分後には最初より増大している。ABS 混入水では振動数は明らかに減少し、振幅は反対に増大し、振幅の増大率は ABS 混入水の方が水道水に比べはるかに大きい。

したがって、ABS 混入水でカワムツの群れの形成が乱れる原因については、次のように推定できる。まず、ABS の毒性による急激な体調変化から各個体の遊泳力は低下するが、個体差のためその程度は一樣ではなく、影響度の大きい個体は群れから脱落することになる。しかし、仲間相互の結合力、あるいは同一目標に定位置しようとする視覚上の問題から、各個体とも一定位置で遊泳を続けようとするが、毒性の影響度の大きい個体は振動数は小さく、それを補償するため振幅は大きくなるので、3 尾が纏って遊泳を続けるためには、その遊泳行動は他の仲間の遊泳を妨害することになる。したがって、その個体は他の仲間から排除されて後退するか、あるいは他の仲間はその個体を避けて前進するような行動を繰返すことになり、全体としては群れが乱れるようになることが考えられる。この実験は ABS の濃度を変えた試水で繰返し行なう必要があるが、今回は 1 試水による 1 回の測定に終わった。

V 考 察

本実験により、次の2点が明らかにされた。

- 1)カワムツはウグイ、アブラハヤに比べ流水中での群れ形成が強固なこと。
- 2)流水中におけるカワムツの群れ行動には水質の影響が現われやすいこと。

このうち、1)の点については実験1で述べたように、ウグイ、アブラハヤは河川の上・中流に棲む魚で、視覚の他、側線感覚が発達し、流水中では各個体が強固な群れを作らなくとも適応できること、カワムツは流れのゆるやかな河川の下流に棲む魚なので、側線感覚より視覚が群れ形成に強く作用し、したがって仲間に対する接近にも視覚的依存度が大きく作用することが考えられ、流水中に身を保持するためには視覚的に十分接触できる範囲に各個体が集合する必要があるように推察される。

2)については、実験3におけるように単体ではABS 10 mg/l 混入水に対しては30分間以上も走流行動を示し、ABSの影響は現われにくいのに対し、群れでは2.5 mg/l 混入水ですでに影響が現われるという水質に対する群れ行動の鋭敏性を示した。おそらく、界面活性剤など汚染物質の影響は実験水路においては単体でも群れを形成する各個体でも同じように受けるであろう。そして、影響を受けた個体は受けないときと比べ、遊泳行動に変化が生ずる。単体の場合はその変化した行動は他に影響を及ぼすことなく、疲労の限界まで走流性を保持するであろうが、群れの場合はその変化した行動は個体間の相互排斥あるいは反発となって、互に間隔を大きくし、あるいは分散度を大きくすることになるであろう。言い換えれば、群れを形成する個体間の微動調整能力の減退といえるであろう。そのことは実験4で示されたカワムツの尾鰭の振動数・振幅の変化から察せられる。

なお、群れ形成には視覚が重要なことはいふ迄もないが、溶存酸素量の減少や、界面活性剤の影響による水質汚染によって視力が衰退し、それが群れ分散の原因となることは考えにくく、遊泳行動の変化が主な原因となっているのであろう。なお、ABSの魚の遊泳能力に及ぼす影響については余り知られてなく、杉本²⁾が纏めた総述によれば、えらの障害は認められるものの遊泳能力には影響はなかったという程度である。

TLm値を求めるバイオアッセイの方法との比較のために、多摩川の下流水20ℓ(水温16~17℃)で、体長3cmのヒメダカ10尾を10日間餌を与えず飼育したが、死亡するものは全くなかった。それに対し、本方法では実験2で述べたように、多摩川下流水によるカワムツの群れ分散度は上流水に比べて極めて大きく、その差は統計的に有意であり、この方法の即時性と有効性が認められた。

VI 要 約

本研究により、次のことが確かめられた。

- 1)水質の判定には、流水中での魚の群れ分散度を指標とすることも一つの方法である。そのテストフィッシュとしてはカワムツが好適であることが認められた。
- 2)多摩川の上・中・下流水を試水として、カワムツの群れ分散度を調べた。上流では分散度1.28、中流

では1.63、下流では3.06で、上流との比較では何れもその差は有意であった。これはDO値、PH値などの化学的要因に基づくものと思われるが、詳細については明らかでない。

3)この方法の精度を確かめるため、界面活性剤ABSの混入濃度を変えてテストした結果、ABSを5.0mg/l以上混入した試水では分散度に影響がはっきり認められたが、2.5mg/lでもその影響は多少認められた。

4)水質汚濁によるカワムツの群れ分散の原因を調べるため遊泳行動の光学的測定を行ない、ABS10mg/lの混入水のなかで尾鰭の振動数、振幅に変化が生じることを観察した。そして、この遊泳行動の変化が群れ分散の原因の一つであると推定した。

引用文献

- 1) 日本生態学会：環境と生物指標2、生物指標としての魚類（水野信彦）、190～196、共立出版（東京）、1975。
- 2) 杉本昭典：水質汚濁（現象と防止対策）、技報堂（東京）、1969。

今後予定される効果

魚類の遊泳力の変化を測定し、環境水汚濁の指標とする試みは今迄アメリカ、西ドイツで行われているが、測定の精度が不十分で広く活用されるまでに至っていない。本研究でも初年度は魚類の遊泳力を汚濁指標とする計画で、各種の装置を利用して河川魚類の遊泳力を測定した。その結果はやはり精度に問題があった。本年度はカワムツをテストフィッシュとして用い、群れ分散度を測定し、その分散度は環境水の汚濁の少差にも鋭敏に変化することを知った。

本研究で用いた回流水槽は小型で比較的廉価でもあり、またカワムツも入手はそれ程困難ではないので、河川水汚濁の測定に有力な方法となるものと思われる。今後、環境水の種々の条件下で測定を行ない、実際に使用可能な方法としたい。